

OPTICAL FREQUENCY BRANCHING ELEMENT

Patent Number: JP5288946
Publication date: 1993-11-05
Inventor(s): OKAMOTO KATSUNARI; others: 02
Applicant(s): NIPPON TELEGR & TELEPH CORP
Requested Patent: ☐ JP5288946
Application: JP19920092550 19920413
Priority Number(s):
IPC Classification: G02B6/12
EC Classification:
Equivalents: JP3061083B2

Abstract

PURPOSE:To obtain the optical frequency branching element which has optical frequency branching characteristics having no polarization dependency.

CONSTITUTION:On a substrate 11, 1st and 2nd optical waveguides 12 and 13 are arranged and put close to each other at two places to constitute directional couplers 14 and 15 and a waveguide length difference is generated between the 1st and 2nd optical waveguides 12 and 13 between the directional couplers 14 and 15 to constitute the optical waveguide element. Further, the core width of the area 16 of the 1st optical waveguide 12 which is long in waveguide length is made wider than the core thickness and others are equalized in core width and core thickness.

Data supplied from the **esp@cenet** database - I2

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号

特開平5-288946

(43) 公開日 平成5年(1993)11月5日

(51) Int.Cl.⁵

G 0 2 B 6/12

識別記号

庁内整理番号

F I

技術表示箇所

F 7036-2K

審査請求 未請求 請求項の数3(全11頁)

(21) 出願番号 特願平4-92550

(22) 出願日 平成4年(1992)4月13日

(71) 出願人 000004226

日本電信電話株式会社

東京都千代田区内幸町一丁目1番6号

(72) 発明者 岡本 勝就

東京都千代田区内幸町一丁目1番6号 日

本電信電話株式会社内

(72) 発明者 鈴木 扇太

東京都千代田区内幸町一丁目1番6号 日

本電信電話株式会社内

(72) 発明者 高橋 浩

東京都千代田区内幸町一丁目1番6号 日

本電信電話株式会社内

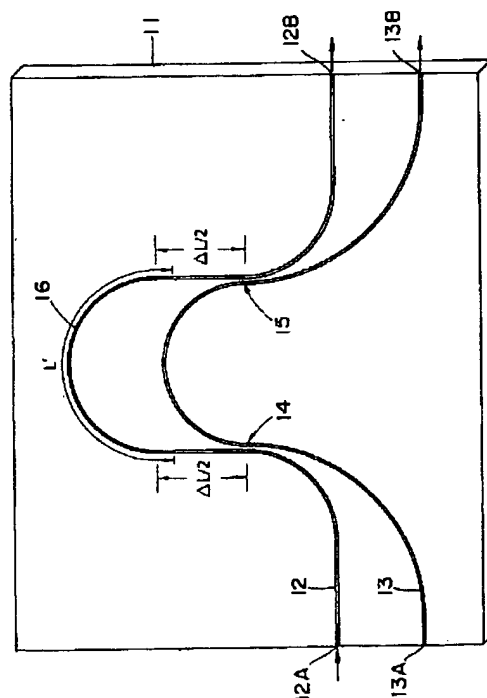
(74) 代理人 弁理士 光石 俊郎

(54) 【発明の名称】 光周波数分岐素子

(57) 【要約】

【目的】 偏波依存性のない光周波数分岐特性を有する光周波数分岐素子を提供する。

【構成】 基板11上に第1および第2の光導波路12、13を配置し、その2箇所互いに接近させて方向性結合器14、15を構成し、方向性結合器14、15間の第1および第2の光導波路12、13間に導波路長差を設けた光導波路素子において、導波路長の長い第1の光導波路12の領域16のコア幅がコア厚に比べて広く、他はコア幅とコア厚とが等しいようにする。



【特許請求の範囲】

【請求項1】 基板上に配置された第1および第2の導波路と、これら第1および第2の導波路を2箇所互いに接近させて構成した第1および第2の方向性結合器とを具え、前記第1および第2の方向性結合器の間を連結する前記第1および第2の導波路に導波路長差を設けた光周波数分岐素子において、前記第1および第2の導波路のうち導波路長の長い方の導波路の一部分はコア幅がコア厚に比べて広く、且つ前記第1および第2の導波路の残りの部分はコア幅とコア厚とが等しいことを特徴とする光周波数分岐素子。

【請求項2】 基板上に配置された入力用チャネル導波路、チャネル導波路アレイおよび出力用チャネル導波路と、前記入力用チャネル導波路とチャネル導波路アレイとを接続する第1の扇型スラブ導波路と、前記チャネル導波路アレイと出力用チャネル導波路とを接続する第2の扇型スラブ導波路とを具え、前記チャネル導波路アレイの長さが所定の導波路長差で順次長くなるように構成された光導波路素子において、前記チャネル導波路アレイの各々の導波路の一部分はコア幅がコア厚に比べて広く、且つ前記チャネル導波路アレイの各々の導波路の残りの部分はコア幅とコア厚とが等しいことを特徴とする光周波数分岐素子。

【請求項3】 請求項1又は2において、導波路が石英系光導波路であることを特徴とする光周波数分岐素子。

【発明の詳細な説明】

$$P_1 = P_0 \sin^2 (\phi) \quad (1)$$

$$P_2 = P_0 \cos^2 (\phi) \quad (2)$$

ここで、 ϕ は光導波路の伝搬定数を β_c とすると次式で※ ※与えられる。

$$\phi = (1/2) \beta_c \Delta L = (\pi f/c) n_c \Delta L \quad (3)$$

ただし、 n_c は等価屈折率であり、波数 $k (= 2\pi/\lambda)$ を用いると次式で表される。

$$n_c = \beta_c / k \quad (4)$$

【0005】 つぎに、入力ポート52Aに周波数 f_1 、および f_2 の二つの信号光が入射した場合を考えよう。☆ 周波数 f_1 、および f_2 の光に対してMを整数として、それぞれ次式(5a)、(5b)が成り立つとする。

$$\phi(f_1) = (\pi f_1 / c) n_c \Delta L = M\pi \quad (5a)$$

$$\phi(f_2) = (\pi f_2 / c) n_c \Delta L = M\pi - (\pi/2) \quad (5b)$$

このとき、式(1)、(2)より、出力ポート52B、53Bの各波長の光に対する出力 $P_1(f_1)$ 、 $P_2(f_2)$ は次式で表される。

$$P_1(f_1) = 0, \quad P_2(f_1) = P_0 \quad (6a)$$

$$P_1(f_2) = P_0, \quad P_2(f_2) = 0 \quad (6b)$$

これより、周波数 f_1 の光は出力ポート53Bに出射し、周波数 f_2 の光は出力ポート52Bに出射することがわかる。また、式(5a)、(5b)を書き直すと、*

$$\Delta L = c / \{2 n_c (f_1 - f_2)\} \quad (7)$$

【0006】 したがって、図5に示すような非対称マッハ・ツェンダー型光周波数分岐素子においては、式(7)が満足されるように導波路長差 ΔL を設定すると、周波数 f_1 および f_2 の二つの信号光を別々の出力ポートに導くことができる。一例として、 $f_1 = 19.354 \text{ THz}$ ($\lambda = 15.5 \mu\text{m}$)、 $f_1 - f_2 = 10$

* 【0001】

【産業上の利用分野】 本発明は、光通信分野等において有用な導波路型の光周波数分岐素子に関し、光分岐特性の偏波依存性を緩和するように工夫したものである。

【0002】

【従来の技術】 光周波数分岐素子は、周波数多重光通信において異なるキャリア周波数の光を合波、分岐するために不可欠な素子である。光周波数分岐素子としては、従来、図5に示すような非対称マッハ・ツェンダー型光周波数分岐素子、あるいは図6に示すようなアレイ導波路格子型光周波数分岐素子が知られている。

【0003】 図5に示す光周波数分岐素子では、シリコン基板51上に光導波路52、53が配置され、光導波路52、53の2箇所互いに接近させることにより方向性結合器54、55が構成されており、光導波路52、53の一端をそれぞれ入力ポート52A、53Aとし、他端をそれぞれ出力ポート52B、53Bとしている。また、2個の方向性結合器54、55の間の光導波路52、53の導波路長差は ΔL に設定されている。なお、一般的には光導波路52、53の幅および厚みは一定である。

【0004】 このように構成された非対称マッハ・ツェンダー型光周波数分岐素子の入力ポート52Aに、周波数 f (波長 $\lambda = c/f$: $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$) の信号光 P_0 が入射した場合、出力ポート52B、53Bの出力 P_1 、および P_2 はそれぞれ次のようになる。

$$P_1 = P_0 \sin^2 (\phi) \quad (1)$$

$$P_2 = P_0 \cos^2 (\phi) \quad (2)$$

$$\phi = (1/2) \beta_c \Delta L = (\pi f/c) n_c \Delta L \quad (3)$$

$$n_c = \beta_c / k \quad (4)$$

☆ 周波数 f_1 、および f_2 の光に対してMを整数として、それぞれ次式(5a)、(5b)が成り立つとする。

$$\phi(f_1) = (\pi f_1 / c) n_c \Delta L = M\pi \quad (5a)$$

$$\phi(f_2) = (\pi f_2 / c) n_c \Delta L = M\pi - (\pi/2) \quad (5b)$$

◆ (1)、 $P_1(f_2)$ 、 $P_2(f_2)$ は次式で表される。

$$P_1(f_1) = 0, \quad P_2(f_1) = P_0 \quad (6a)$$

$$P_1(f_2) = P_0, \quad P_2(f_2) = 0 \quad (6b)$$

* 2個の方向性結合器54、55間の光導波路52、53の導波路長差 ΔL に関する条件は次のように表される。

$$\Delta L = c / \{2 n_c (f_1 - f_2)\} \quad (7)$$

$G H_z$ 、 $n_c = 1.445$ とすると、 $M = 9677$ 、 $\Delta L = 1.04 \text{ cm}$ となる。

【0007】 しかしながら、シリコンを基板とする石英系光導波路においては、ガラスがシリコンの熱収縮による圧縮応力を受けるために、基板面に平行な偏波の光(T Eモード)と基板面に垂直な偏波の光(T Mモード)

ド)の伝搬定数が異なり、光周波数分岐特性に偏波依存性があった。例えば、TEモードとTMモードの伝搬定数を $\beta_{c,TE}$ 、 $\beta_{c,TM}$ とし、式(4)で定義される等価屈折率をそれぞれ $n_{c,TE}$ 、 $n_{c,TM}$ として、TEモードに対*

$$\phi_{TE}(f_1) = (\pi f_1 / c) n_{c,TE} \Delta L = M\pi \quad (8a)$$

$$\phi_{TE}(f_2) = (\pi f_2 / c) n_{c,TE} \Delta L = M\pi - (\pi/2) \quad (8b)$$

このとき、TMモードに対しては次式(9a)、(9※ ※b)が成り立つ。

$$\begin{aligned} \phi_{TM}(f_1) &= (\pi f_1 / c) n_{c,TM} \Delta L \\ &= M\pi \{1 + (B_c / n_{c,TE})\} \end{aligned} \quad (9a)$$

$$\begin{aligned} \phi_{TM}(f_2) &= (\pi f_2 / c) n_{c,TM} \Delta L \\ &= \{M\pi - (\pi/2)\} \{1 + (B_c / n_{c,TE})\} \end{aligned} \quad (9b)$$

ただし、ここで B_c はTMモードとTEモードの複屈折率であり次式(10)で与えられる。なお、シリコンを★

$$B_c = n_{c,TM} - n_{c,TE} \quad (10)$$

【0008】前述の例に基づいて、 $f_1 = 193.54$ THz ($\lambda = 1.55 \mu m$)、 $f_1 - f_2 = 10$ GHz、 $n_{c,TE} = 1.445$ 、 $M = 9677$ 、 $\Delta L = 1.04$ c ★

*して式(5)が満足されるように導波路長差 ΔL が設定されているとする。すなわち、次式(8a)、(8b)が満足されているとする。

★基板とする石英系光導波路においては、 $B_c = 1 \sim 4 \times 10^{-4}$ 程度である。

☆ m 、 $B_c = 2 \times 10^{-4}$ とするとTEモード、およびTMモードに対する光分岐特性は次のようになる。

$$P_{1,TE}(f_1) = 0, \quad P_{2,TE}(f_1) = P_0 \quad (11a)$$

$$P_{1,TE}(f_2) = P_0, \quad P_{2,TE}(f_2) = 0 \quad (11b)$$

$$\begin{aligned} P_{1,TM}(f_1) &= P_0 \sin^2 (M\pi B_c / n_{c,TE}) \\ &\approx 0.766 P_0 \end{aligned} \quad (12a)$$

$$\begin{aligned} P_{2,TM}(f_1) &= P_0 \cos^2 (M\pi B_c / n_{c,TE}) \\ &\approx 0.234 P_0 \end{aligned} \quad (12b)$$

$$\begin{aligned} P_{1,TM}(f_2) &= P_0 \cos^2 [\{M\pi - (\pi/2)\} (B_c / n_{c,TE})] \\ &\approx 0.234 P_0 \end{aligned} \quad (13a)$$

$$\begin{aligned} P_{2,TM}(f_2) &= P_0 \sin^2 [\{M\pi - (\pi/2)\} (B_c / n_{c,TE})] \\ &\approx 0.766 P_0 \end{aligned} \quad (13b)$$

【0009】このように、従来の非対称マッハ・ツェンダー型光周波数分岐素子においては、光周波数分岐特性に偏波依存性があり、偏波面が規定されない単一モード光ファイバと接続した場合には、所望の光周波数分岐特性が得られないという問題がある。

【0010】一方、図6に示すようなアレイ導波路格子型光周波数分岐素子においては、シリコン基板61上に入力用チャネル導波路62、チャネル導波路アレイ63、および出力用チャネル導波路64が配置されており、また、前記入力用チャネル導波路62とチャネル導波路アレイ63とを接続する第1の扇型スラブ導波路65と、前記チャネル導波路アレイ63と出力用チャネル導波路64とを接続する第2の扇型スラブ導波路66とが配置されている。なお、チャネル導波路アレイ63における各光導波路は、順次 ΔL ずつ導波路長が変化する◆

$$\phi = \beta_c (L + q \Delta L) \quad (14a)$$

$$\phi = \beta_c [L + (q-1) \Delta L] \quad (14b)$$

【0012】つぎに、扇型スラブ導波路中に距離 R の位置に点 P をとり、境界AおよびBから伝搬する光の位相を求めてみる。スラブ導波路66における光の伝搬定数は、チャネル導波路63中の伝搬定数 β_c とは異なるの

$$\psi_A = \beta_s R \quad (15a)$$

◆ように設定されている。また、一般には、各光導波路の幅および厚さは一定である。

【0011】このように構成されたアレイ導波路格子型光周波数分岐素子の入力用チャネル導波路62に、周波数 f (波長 $\lambda = c/f$)の信号光が入射した場合、チャネル導波路アレイ63と第2の扇型スラブ導波路66との接続部分近傍における光の伝搬の様子は図7に示すようになる。ここで、 R は、扇型スラブ導波路66の半径である。いま、 $(q-1)$ 番目の導波路を伝搬してきた光と q 番目の導波路を伝搬してきた光に着目する。チャネル導波路アレイ63と第2の扇型スラブ導波路66との境界AおよびBにおける二つの光の位相は、それぞれ次式で与えられる。なお、 L はチャネル導波路アレイ63における最短の導波路の長さである。

で、これを β_s とすると、境界AおよびBから点 P に到る光の位相は次のように表される。ただし、 d はAとBの間隔であり、 θ は直線APと中心線との角度である。

5

$$\psi_s = \beta_s (R + d \sin \theta)$$

【0013】したがって、チャネル導波路アレイ63を
通って扇型スラブ導波路66の点Pに到る場合う二つの*

$$\Theta = (\phi_A + \psi_A) - (\phi_B + \psi_B) \quad (16)$$

したがって、 $\Theta = 2m\pi$ (m は整数) のとき、光は強め
合って干渉する。すなわち、次式(17)が成り立つと※ する。

$$\Theta = \beta_c \Delta L - \beta_s d \sin \theta = 2m\pi \quad (17)$$

【0014】式(17)は等価屈折率を用いて表すと次★ ★のようになる。

$$n_c \Delta L - n_s d \sin \theta = m\lambda \quad (18)$$

ただし、 n_s はスラブ導波路領域の等価屈折率であり、☆10☆次式で表される。

$$n_s = \beta_s / k \quad (19)$$

また、扇型スラブ導波路66の中心線上の点Oと点Pと◆ ◆の距離 x_s とすると、 x_s は次式で表される。

$$x_s = R \sin \theta = (n_c \Delta L - m\lambda) \{R / (n_s d)\} \quad (20)$$

この式(20)から、波長 λ の光が扇型スラブ導波路6

6の中心線上の点Oに集光するための条件は、 $x_s = 0$ *

$$m = (n_c \Delta L / \lambda) \quad (21)$$

一例として、 $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ ($f = 193.54 \text{ THz}$)、 $n_c = 1.445$ とすると $m = 1548$ である。

※だけ異なる光が図6のアレイ導波路格子型光周波数分岐素子に入射した場合を考える。この場合、式(18)、(20)より次式が得られる。

【0015】つぎに、波長が $\delta\lambda$ ($= -\lambda^2 \delta f / c$) ※20

$$\begin{aligned} n_c (\lambda + \delta\lambda) \Delta L - n_s (\lambda + \delta\lambda) d \{ (x_s + \delta x) / R \} \\ = (\lambda + \delta\lambda) m \end{aligned} \quad (22)$$

なお、 $n_c (\lambda + \delta\lambda)$ 、 $n_s (\lambda + \delta\lambda)$ はそれぞれ、波長 $(\lambda + \delta\lambda)$ の光に対するチャネル導波路、およびスラブ導波路の屈折率であり、 $(x_s + \delta x)$ 波長 $(\lambda + \delta\lambda)$ の光が集光する位置である。★

★【0016】ここで、式(20)、(21)、(22)、および $n_s \gg \{\lambda (dn_s / d\lambda)\}$ であることを用いると、次式が成り立つ。

$$\begin{aligned} \delta x &= - \{ (mR) / (n_s d) \} (N_c / n_c) \delta\lambda \\ &= \{ (\lambda^2 mR) / (n_s d c) \} (N_c / n_c) \delta f \end{aligned} \quad (23)$$

ただし、 N_c は群屈折率であり、次式で表される。

$$N_c = n_c - \lambda (dn_c / d\lambda) \quad (24)$$

【0017】前述のパラメータ $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ ($f = 193.54 \text{ THz}$)、 $n_c = 1.445$ 、 $m = 1548$ を用い、さらに $\Delta L = 1660 \mu\text{m}$ 、 $d = 20 \mu\text{m}$ 、☆

☆ $R = 6 \text{ mm}$ 、 $N_c = 1.465$ 、 $n_s = 1.45$ とすると、式(23)より、 δx は次式のようになる。

$$\delta x = 2.6 \times 10^{-15} \delta f \quad (\text{m}) \quad (25)$$

すなわち、 $\delta f = 10 \text{ GHz}$ のときには、上式から $\delta x = 26 \mu\text{m}$ となり、 10 GHz 間隔で周波数の異なる光を分離できることがわかる。

【0018】なお、図5の非対称マッハ・ツェンダー型光周波数分岐素子と図6のアレイ導波路格子型光周波数分岐素子との相違点は、前者が二つの周波数の光を分離するのに対して、後者は多数の周波数の光を一括して分離できる点である。

【0019】ところで、シリコンを基板とする石英系光導波路においては、ガラスがシリコンの熱収縮による圧縮応力を受けるために、基板面に平行な偏波の光(TEモード)と基板面に垂直な偏波の光(TMモード)の伝◆

$$m = (n_{c,TE} \Delta L) / \lambda \quad (26)$$

【0021】このとき、TMモードの光に対しては、式*

$$x_{s,TM} = (n_{c,TM} \Delta L - m\lambda) \{R / (n_{s,TM} d)\} \quad (27)$$

【0022】TMモードとTEモードの複屈折率は、通 50 常 $B_c = n_{c,TM} - n_{c,TE} = 2 \times 10^{-4}$ (コア厚さ=コア

◆搬定数が異なり、従来の図6に示すようなアレイ導波路格子型光周波数分岐素子においても光周波数分岐特性に偏波依存性がある。

【0020】例えば、TEモードとTMモードのチャネル導波路における伝搬定数を $\beta_{c,TE}$ 、 $\beta_{c,TM}$ 、スラブ導波路における伝搬定数を $\beta_{s,TE}$ 、 $\beta_{s,TM}$ とし、等価屈折率をそれぞれ $n_{c,TE}$ 、 $n_{c,TM}$ 、および $n_{s,TE}$ 、 $n_{s,TM}$ として、TEモードに対して式(21)が満足されるように導波路長差 ΔL が設定されているとする。すなわち、 m は次式で表され、TEモードの光は点Oに集光する($x_{s,TE} = 0$)とする。

幅 = $7 \mu\text{m}$ 、屈折率差 $\Delta = 0.7\%$ の場合)、 $B_s = n_{s, TM} - n_{s, TE} = 1.8 \times 10^{-4}$ (コア厚さ = $7 \mu\text{m}$ 、屈折率差 $\Delta = 0.7\%$ の場合) であるから、上式より TE *

$$x_{s, TM} - x_{s, TE} = (B_s R \Delta L) / (n_{s, TM} d) \quad (28)$$

$$\approx 68.7 (\mu\text{m})$$

【0023】このように、従来のアレイ導波路格子型光周波数分岐素子においては、光周波数分岐特性に偏波依存性があり、偏波面が規定されない単一モード光ファイバと接続した場合には、所望の光周波数分岐特性が得られないという問題がある。

【0024】

【発明が解決しようとする課題】前述したように従来の図5に示すような非対称マッハ・ツェンダー型光周波数分岐素子、あるいは図6に示すようなアレイ導波路格子型光周波数分岐素子においては、光周波数分岐特性に偏波依存性があり、偏波面が規定されない単一モード光ファイバ (日本縦貫光通信回線等、既設の全ての光ファイバ) と接続した場合には、所望の光周波数分岐特性が得られないという問題がある。

【0025】本発明は、このような事情に鑑みなされたものであり、コア幅がコア厚さに比べて広い矩形光導波路を採用することにより、構造的複屈折率で基板の圧縮応力に基づく複屈折率を緩和して偏波依存性をなくし、大容量・長距離光通信に適した光周波数分岐素子を提供することを目的とする。

【0026】

【課題を解決するための手段】前記目的を達成する本発明に係る光周波数分岐素子は、基板上に配置された第1および第2の導波路と、これら第1および第2の導波路を2箇所まで互いに接近させて構成した第1および第2の方向性結合器とを具え、前記第1および第2の方向性結合器の間を連結する前記第1および第2の導波路に導波路長差を設けた光周波数分岐素子において、前記第1および第2の導波路のうち導波路長の長い方の導波路の一部分はコア幅がコア厚に比べて広く、且つ前記第1および第2の導波路の残りの部分はコア幅とコア厚とが等しいことを特徴とし、また、基板上に配置された入力用チャネル導波路、チャネル導波路アレイおよび出力用チャネル導波路と、前記入力用チャネル導波路とチャネル導波路アレイとを接続する第1の扇型スラブ導波路と、前記チャネル導波路アレイと出力用チャネル導波路とを接続する第2の扇型スラブ導波路とを具え、前記チャネル導波路アレイの長さが所定の導波路長差で順次長くなるように構成された光導波路素子において、前記チャネル導波路アレイの各々の導波路の一部分はコア幅がコア厚※

*モードとTMモードの光の集光する位置のずれは、次式のようにになる。

※に比べて広く、且つ前記チャネル導波路アレイの各々の導波路の残りの部分はコア幅とコア厚とが等しいことを特徴とする。

【0027】

10 【作用】コア幅がコア厚さに比べて広い矩形光導波路においては、光の閉じ込め効果がTEモードとTMモードに対して異なるために、構造的複屈折率が生じる。この構造的複屈折率は、コア幅がコア厚さに比べて広い場合には、シリコン基板の圧縮応力に基づく複屈折率を打ち消すようにはたらく。したがって、光導波路の一部分のコア幅をコア厚さに比べて広くすることによって、偏波依存性のない光周波数分岐特性を得ることができる。

【0028】

【実施例】以下、本発明を実施例に基づいて説明する。

20 【0029】図1には一実施例に係る光周波数分岐素子を示す。同図に示すように、シリコン基板11上に光導波路12、13が配置され、光導波路12、13の2箇所所でこれら光導波路12、13を互いに近接させることにより方向性結合器14、15が構成されており、光導波路12、13の一端をそれぞれ入力ポート12A、13Aとし、他端をそれぞれ出力ポート12B、13Bとしている。また、2個の方向性結合器14、15の間の光導波路12、13の導波路長差は ΔL に設定されている。さらに、2個の方向性結合器14、15間の光導波路12、13のうち導波路長の長い方 (ここでは光導波路12) の一部において、長さ L' の領域16にわたって導波路のコア幅 (2a) がコア厚 (2t) に比べて広がっている。ただし、領域16のコア厚2tは他の領域の光導波路12、13のコア厚と同じであり、コア幅2aのみが他の領域の光導波路12、13に比べて広がっている。また、コア幅の広い領域16の光導波路と他の光導波路とは、緩やかなテーパによって接続されている。なお、図1ではテーパの接続部分の図示は省略されている。

40 【0030】本実施例の非対称マッハ・ツェンダー型光周波数分岐素子の入力ポート12Aに、周波数 f (波長 $\lambda = c/f$) の信号光 P_0 が入射した場合、出力ポート12B、13Bの出力 P_1 、および P_2 はそれぞれ次のようになる。

$$P_1 = P_0 \sin^2 (\phi) \quad (29)$$

$$P_2 = P_0 \cos^2 (\phi) \quad (30)$$

ここで、 ϕ は光導波路12、13の伝搬定数を β_c 、領域16の伝搬定数を β とすると、次式で表される。

$$\phi = (1/2) \{ \beta L' - \beta_c (L' - \Delta L) \} \quad (31)$$

【0031】いま、光導波路12、13におけるTEモ 50 ードの伝搬定数を $\beta_{c, TE}$ 、等価屈折率を $n_{c, TE}$ とし、領

域16におけるTEモードの伝搬定数を β_{TE} 、等価屈折率を n_{TE} として、TEモードに対して次式が満足されるように導波路長 ΔL 、および領域16の長さ L' が設*

$$\phi_{TE}(f_1) = (\pi f_1 / c) \{n_{TE} L' - n_{c,TE} (L' - \Delta L)\} = M\pi \quad (32a)$$

$$\phi_{TE}(f_2) = (\pi f_2 / c) \{n_{TE} L' - n_{c,TE} (L' - \Delta L)\} = M\pi - (\pi/2) \quad (32b)$$

このとき、TEモードの光に対しては、次式が成り立※ ※つ。

$$P_{1,TE}(f_1) = 0, \quad P_{2,TE}(f_1) = P_0 \quad (33a)$$

$$P_{1,TE}(f_2) = P_0, \quad P_{2,TE}(f_2) = 0 \quad (33b)$$

【0032】つぎに、光導波路12、13におけるTMモードの伝搬定数を β_{TM} 、等価屈折率を n_{TM} とし、領域16におけるTMモードの伝搬定数を β_{TM} 、等価屈*

$$\phi_{TM}(f_1) = (\pi f_1 / c) \{n_{TM} L' - n_{c,TM} (L' - \Delta L)\} = M'\pi \quad (34a)$$

$$\phi_{TM}(f_2) = (\pi f_2 / c) \{n_{TM} L' - n_{c,TM} (L' - \Delta L)\} = M'\pi - (\pi/2) \quad (34b)$$

このとき、TMモードの光に対しては、次式が成り立☆ ☆つ。

$$P_{1,TM}(f_1) = 0, \quad P_{2,TM}(f_1) = P_0 \quad (35a)$$

$$P_{1,TM}(f_2) = P_0, \quad P_{2,TM}(f_2) = 0 \quad (35b)$$

【0033】ここで、式(33a)、(33b)、(35a)、(35b)が満足されるためには、式(32a)、(32b)、(34a)、(34b)より、次式◆

$$\{n_{TE} L' - n_{c,TE} (L' - \Delta L)\} = c / \{2(f_1 - f_2)\} \quad (36a)$$

$$\{n_{TM} L' - n_{c,TM} (L' - \Delta L)\} = c / \{2(f_1 - f_2)\} \quad (36b)$$

【0034】すなわち、上式より、 L' は次式で与え*

$$L' = \{B_c / (B_c - B)\} \Delta L \quad (37)$$

したがって、式(37)が成り立つように領域16の長さ L' を設定すれば、TEモードおよびTMモードのいずれの光に対しても式(33a)、(33b)、(35a)、(35b)が満足され、偏波依存性のない光周波※

$$B = n_{TM} - n_{TE}$$

(38)

【0035】図2は、屈折率差 $\Delta = 2\%$ 、コア厚 $2t = 3\mu m$ の光導波路において、コア幅 $2a$ を変化させたときの領域16の光導波路の複屈折率 B の変化を波長 $\lambda = 1.55\mu m$ に対して計算したものである。 $2a = 3\mu m$ の場合の複屈折率は、他の領域の光導波路12、13の複屈折率 B_c と同じとなる。一例として、 $2a = 5\mu m$ とすると、 $B = 8 \times 10^{-5}$ ($n_{TE} = 1.4616$ 、 $n_{TM} = n_{TE} + B$)である。 $f_1 = 193.54THz$ ($\lambda = 1.55\mu m$)、 $f_1 - f_2 = 10GHz$ とすると、光導波路12、13の複屈折率は $B_c = 2 \times 10^{-4}$ ($n_{c,TE} = 1.457$ 、 $n_{c,TM} = n_{c,TE} + B$)であるから、 $M = M' = 9677$ 、 $\Delta L = 1.024cm$ 、 $L' = 1.707cm$ となる。

【0036】図1の光周波数分岐素子の一作製例として、石英系光導波路を例を説明する。まず、Si基板上に火災堆積法によってSiO₂下部クラッド層を堆積し、次にGeO₂をドーパントとして添加したSiO₂ガラスのコア層を堆積した後に、電気炉で透明ガラス化

*定されているとする。すなわち、 M を整数としたとき周波数 f_1 および f_2 の光に対して、それぞれ次式が成り立つとする。

★折率を n_{TM} として、TMモードに対する光伝搬特性を求めてみる。 M' を整数とすると周波数 f_1 および f_2 の光に対して、それぞれ次式が成り立つとする。

◆(36a)、(36b)が成り立てばよいことがわかる。

*れる。

※数分岐特性を得ることができる。ただし、式(37)において B_c は式(10)で与えられ、 B は次式で与えられる。

した。次に、前記設計に基づくマスクパターンを用いてコア層をエッチングしてコアを形成した後、再びSiO₂上部クラッド層を堆積して作製した。

【0037】このように、作製した光周波数分岐素子の入力ポート12Aに波長 $1.55\mu m$ 帯の周波数 f_1 および f_2 の2つの信号光を入射させたところ、入射光の偏波状態にかかわらず周波数 f_1 の光は出力ポート13Bに射出し、周波数 f_2 の光は出力ポート12Bに射出することが確かめられた。

【0038】図3には他の実施例に係る光周波数分岐素子を示す。同図に示すように、シリコン基板31上に入力用チャネル導波路32、チャネル導波路アレイ33および出力用チャネル導波路34が配置され、また、前記入力用チャネル導波路32とチャネル導波路アレイ33とを接続する第1の扇型スラブ導波路35と、前記チャネル導波路アレイ33と出力用チャネル導波路34とを接続する第2の扇型スラブ導波路36とが配置されている。ここで、チャネル導波路アレイ33における各光導

波路は、順次 ΔL ずつ導波路長が変化するように設定されている。また、チャネル導波路アレイ33の一部において、長さ L' の領域37にわたって導波路のコア幅(2a)がコア厚(2t)に比べて広くなっている。ただし、領域31のコア厚2tは他の領域のチャネル光導波路のコア厚と同じであり、コア幅2aのみが他の領域の光導波路に比べて広くなっている。また、コア幅の広い領域37の光導波路と他のチャネル光導波路とは、緩やかなテーパによって接続されている。なお、図3ではテーパの部分は省略されている。

【0039】本実施例のアレイ導波路格子型光周波数分*

$$\phi_A = \beta_c [L + q \Delta L - q L'] + \beta q L' \quad (39a)$$

$$\phi_B = \beta_c [L + (q-1) \Delta L - (q-1) L'] + \beta (q-1) L' \quad (39b)$$

【0041】つぎに、扇型スラブ導波路中に距離Rの位置に点Pをとり、境界AおよびBから伝搬する光の位相※

$$\psi_A = \beta_s R \quad (40a)$$

$$\psi_B = \beta_s (R + d \sin \theta) \quad (40b)$$

【0042】したがって、チャネル導波路アレイ33を通って扇型スラブ導波路36の点Pに到る隣合う二つの★20

$$\Theta = (\phi_A + \psi_A) - (\phi_B + \psi_B) \quad (41)$$

そして、 $\Theta = 2m\pi$ (mは整数) のとき、光は強め合っして干渉する。すなわち、次式(42)が成り立つとき、☆

$$\Theta = \beta_c (\Delta L - L') + \beta L' - \beta_s d \sin \theta = 2m\pi \quad (42)$$

また、扇型スラブ導波路36の中心線上の点Oと点Pと◆

$$x_m = \{ \beta_c (\Delta L - L') + \beta L' - 2m\pi \} / (\beta_s d) \quad (43)$$

この式(43)から、各周波数 ω_m ($= 2\pi f_m$; 波長 λ_m) の光が扇型スラブ導波路36の中心線上の点Oに*

$$\beta_c (\Delta L - L') + \beta L' - 2m\pi \quad (44)$$

【0043】つぎに、各周波数が $\delta\omega$ ($= 2\pi\delta f$) だけ異なる光が図3のアレイ導波路格子型光周波数分岐素※ (43)、および $x_m = 0$ を用いると次式が得られる。

$$\delta x = \{ (2\pi R \delta f) / (\beta_s d) \} \{ \beta_c' (\Delta L - L') + \beta' L' \} \quad (45)$$

ただし、ここで、 β' は次式で表され、また、Nは式★ (24) で与えられる群屈折率である。

$$\beta' = d\beta/d\omega = (1/c) (d\beta/d\omega) \approx N/c \quad (46)$$

いま、チャネル導波路33、扇型スラブ導波路36、およびコア幅の広い領域37におけるTEおよびTMモードの伝搬定数が、 $\beta_{c,TE}$ 、 $\beta_{s,TE}$ 、 β_{TE} 、および $\beta_{c,TM}$ 、 $\beta_{s,TM}$ 、 β_{TM} 、であるとする。このとき、式☆

$$\beta_{c,TE} (\Delta L - L') + \beta_{TE} L' = 2m\pi \quad (47a)$$

$$\beta_{c,TM} (\Delta L - L') + \beta_{TM} L' = 2m\pi \quad (47b)$$

$$\{ (2\pi R \delta f) / (\beta_{s,TE} d) \} \{ \beta_{c,TE}' (\Delta L - L') + \beta_{TE}' L' \}$$

$$\{ (2\pi R \delta f) / (\beta_{s,TM} d) \} \{ \beta_{c,TM}' (\Delta L - L') + \beta_{TM}' L' \} \quad (48)$$

【0044】チャネル導波路33、扇型スラブ導波路36、およびコア幅の広い領域37におけるTEおよびTMモードの等価屈折率が $n_{c,TE}$ 、 $n_{s,TE}$ 、 n_{TE} 、および $n_{c,TM}$ 、 $n_{s,TM}$ 、 n_{TM} であり、群屈折率が $N_{c,TE}$ 、N

$$n_{s,TM}/n_{s,TE} \approx 1 \quad (49a)$$

$$N_{c,TM} - N_{c,TE} \approx n_{c,TM} - n_{c,TE} \quad (49b)$$

* 岐素子の入力用チャネル導波路32に、周波数f (波長 $\lambda = c/f$) の信号光が入射した場合、チャネル導波路アレイ33と第2の扇型スラブ導波路36との接続部近傍における光の伝搬の様子は図4に示すようになる。ここで、Rは、扇型スラブ導波路の半径である。

【0040】いま、(q-1) 番目の導波路を伝搬してきた光とq番目の導波路を伝搬してきた光に着目する。チャネル導波路アレイ33と第2の扇型スラブ導波路36との境界AおよびBにおける2つの光の位相は、それぞれ次式で与えられる。ここで、Lはチャネル導波路アレイ33における最短の導波路の長さである。

※を求めると次のようになる。

★導波路の光の位相差は、次式(41)で示される。

☆チャネル導波路アレイ33を通った光は点Pに集光する。

◆の距離 x_m 。とすると、次式で与えられる。

*集光するための条件は、 $x_m = 0$ より、次式(44)で表される。

30※子に入射した場合を考える。この場合、式(42)、(43)、および $x_m = 0$ を用いると次式が得られる。

★(24)で与えられる群屈折率である。

☆(44)および(45)に対して、次の式(47a)、(47b)、(48)が満足されるとき、TE、TMモードに光は偏波状態に依らず一括して周波数分離されることがわかる。

s_{TE} 、 N_{TE} 、および $N_{c,TM}$ 、 $N_{s,TM}$ 、 N_{TM} であるとする。このとき、式(48)に対して、次の式(49a)、(49b)、(49c)なる関係を用いる。

$$N_{TM} - N_{TE} \approx n_{TM} - n_{TE}$$

これにより、式(47)、(48)は次の条件が成り立つ* *てば満足されることがわかる。

$$L' = \{B_c / (B_c - B)\} \Delta L \quad (50)$$

ただし、上式において B_c は式(10)で与えられ、 B は式(38)で与えられる。

【0045】一例として、コア幅の広い領域37におけるコア厚 $2t = 3 \mu m$ 、コア幅 $2a = 5 \mu m$ とすると、 $B = 8 \times 10^{-5}$ ($n_{TE} = 1.4616$ 、 $n_{TM} = n_{TE} + B$)である。 $\lambda = 1.55 \mu m$ ($f = 193.54 THz$)

$$\delta x = 2.57 \times 10^{-15} \delta f \quad (m) \quad (51)$$

そして、 $\delta f = 10 GHz$ のときには、上式から $\delta x = 25.7 \mu m$ となり、偏波状態に関係なく $10 GHz$ 間隔で周波数の異なる光を分離できることがわかる。

【0046】次に、本実施例の光周波数分岐素子の製造を石英系光導波路を用いて行った例を示す。まず、 Si 基板上に火災堆積法によって SiO_2 下部クラッド層を堆積し、次いで GeO_2 をドーパントとして添加した SiO_2 ガラスのコア層を堆積した後に、電気炉で透明ガラス化した。次に、前記設計に基づくマスクパターンを用いてコア層をエッチングしてコアを形成した後、再び SiO_2 上部クラッド層を堆積して作製した。このように、作製した光周波数分岐素子の入力用チャネル導波路39に波長 $1.55 \mu m$ 帯で周波数間隔 $10 GHz$ の光を入射させたところ、入射光の偏波状態にかかわらず $\delta x = 25.7 \mu m$ 間隔に置かれた出力用チャネル導波路34に周波数間隔 $10 GHz$ の光が分離されることが確かめられた。

【0047】

【発明の効果】以上、実施例に基づいて具体的に説明したように、本発明の光周波数分岐素子は、コア幅がコア厚さに比べて広い矩形光導波路を採用することにより、構造的複屈折率で基板の圧縮応力に基づく複屈折率緩和をしているので、入射光の偏波状態に関係なく異なるキャリア周波数の光を合波、分岐できるために、周波数多重光通信において大きな利点を有する。

【図面の簡単な説明】

【図1】本発明の一実施例に係る光周波数分岐素子の構成図である。

(49c)

※ H_z)、 $d = 20 \mu m$ 、 $R = 6 mm$ 、 $N_{TE} = 1.482$ 、 $N_{c,TE} = 1.477$ 、 $n_s = 1.466$ とすると、チャネル導波路33の複屈折率は $B_c = 2 \times 10^{-4}$ ($n_{c,TE} = 1.457$ 、 $n_{c,TM} = n_{TE} + B$)であるから、 $m = 1548$ 、 $\Delta L = 1638 \mu m$ 、 $L' = 2730 \mu m$ のとき式(45)より、次式が得られる。

(51)

【図2】コア幅 $2a$ を変化させたときの図1の領域16の光導波路の複屈折率 B の変化を波長 $\lambda = 1.55 \mu m$ に対して計算した図である。

【図3】本発明の他の実施例に係る光周波数分岐素子の構成図である。

【図4】図3のチャネル導波路アレイ33と第2の扇型スラブ導波路36の接続部近傍における光の伝搬を示す図である。

【図5】従来の非対称マッハ・ツェンダー型光周波数分岐素子を示す図である。

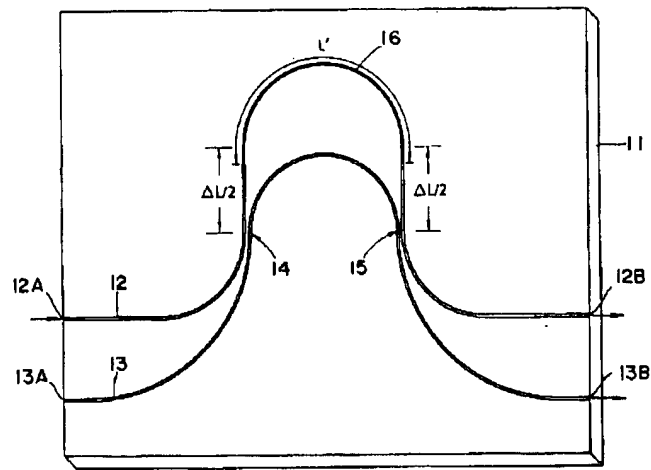
【図6】従来のアレイ導波路格子型光周波数分岐素子を示す図である。

【図7】チャネル導波路アレイ63と第2の扇型スラブ導波路66の接続部近傍における光の伝搬を示す図である。

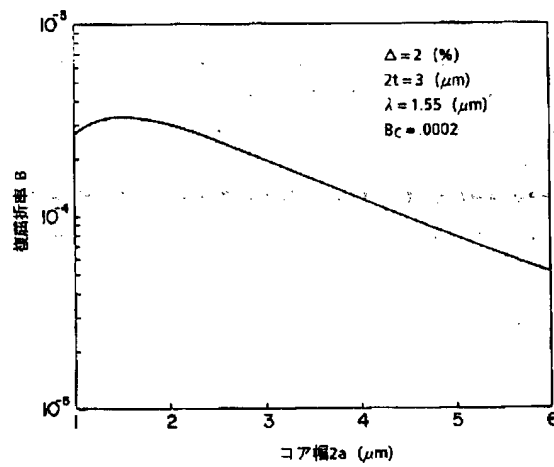
【符号の説明】

- 11 シリコン基板
- 12、13 第1および第2の光導波路
- 14、15 第1および第2の方向性結合器
- 16 コア厚にくらべてコア幅が広い光導波路の領域
- 31 シリコン基板
- 32 入力用チャネル導波路
- 33 チャネル導波路アレイ
- 34 出力用チャネル導波路
- 35 第1の扇型スラブ導波路
- 36 第2の扇型スラブ導波路
- 37 コア厚にくらべてコア幅が広い光導波路の領域

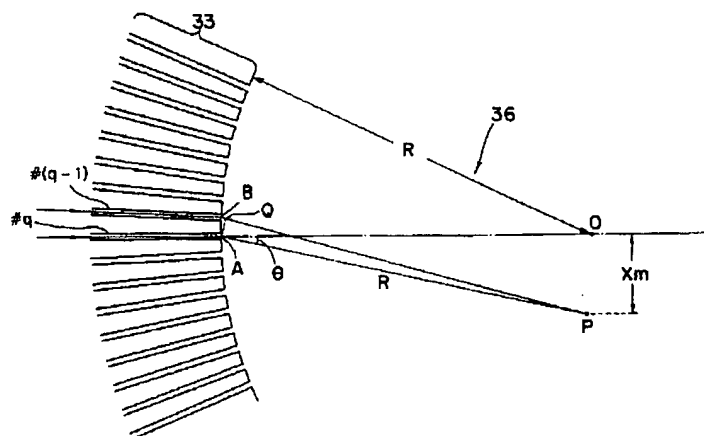
【図1】



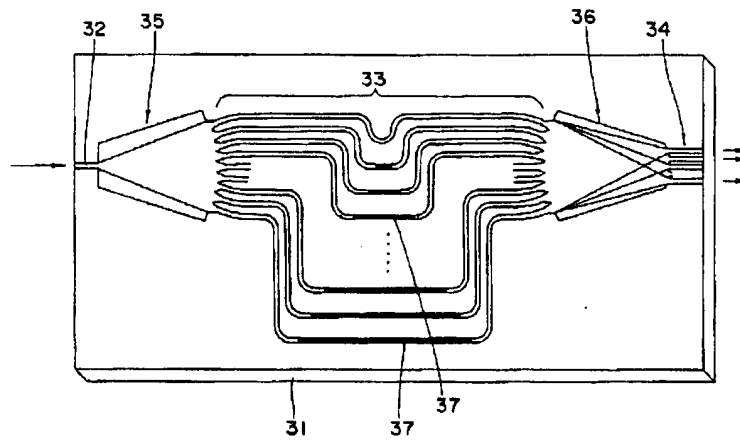
【図2】



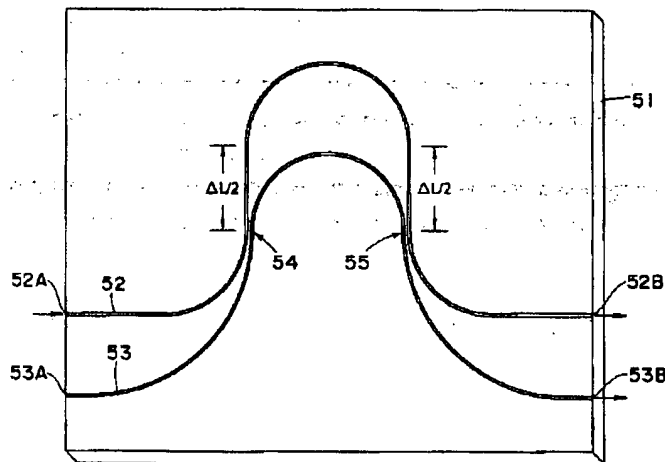
【図4】



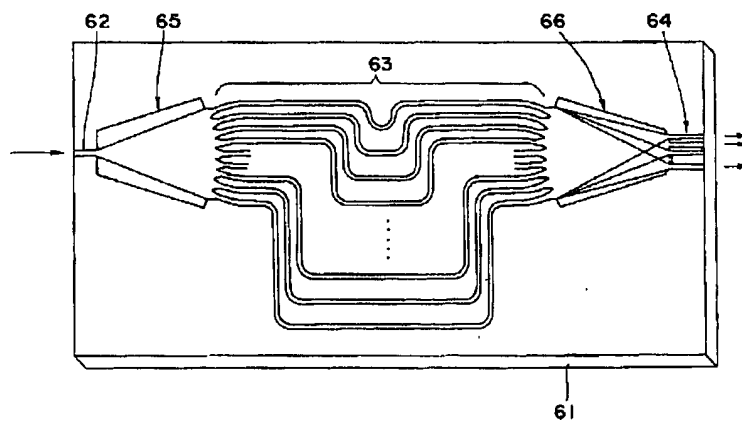
【図3】



【図5】



【図6】



【図7】

